

航空发动机起动故障现场诊断与排故工程实践

李一豪

西安航天发动机有限公司 陕西 西安 710100

摘要: 本文旨在系统性地探讨航空发动机起动故障的现场诊断与排故工程实践。首先,文章深入剖析了现代航空发动机起动系统的基本组成、工作原理及典型故障模式;其次,详细阐述了基于工程经验、数据分析和智能算法的综合诊断技术体系,并梳理了标准化的现场排故流程;再次,通过引入真实工程案例,具体展示了从故障现象捕捉、原因分析到最终排除的全过程;最后,结合当前行业发展趋势,对基于大数据、人工智能的预测性维护等前沿技术在起动故障诊断中的应用前景进行了展望。本文的研究成果可为民航机务维修人员、发动机工程师及相关技术人员提供一套系统、实用的理论指导与实践参考,对于提升航空器运行的安全性、可靠性和经济性具有重要的现实意义。

关键词: 航空发动机;起动故障;现场诊断;排故工程;故障模式

引言

在当代航空领域,发动机的性能与可靠性直接决定飞行器的作战效能与商业价值,而成功起动是所有飞行任务的前提。据统计,大量民航航班延误或取消源于起动阶段异常。起动过程高度非线性,涉及燃油、空气、点火与控制系统精密协同,需将转子从静止加速至自持转速(通常为慢车转速),期间经历复杂的热力学与动力学变化,极易受高海拔、极寒等外部环境及内部部件性能衰退影响,诱发故障。若现场未能及时准确诊断排故,不仅造成经济损失,还可能引发二次损伤——如热悬挂导致涡轮叶片过热烧蚀,造成不可逆损坏。因此,构建科学、高效、可靠的现场诊断与排故体系,对保障飞行安全、提升机队出勤率、降低维修成本至关重要。本研究聚焦此核心需求,整合理论、技术与实践经验,旨在为一线维修工程提供一套完整、可操作的解决方案。

1 航空发动机起动系统概述

1.1 起动系统基本组成与工作原理

现代大型民用航空发动机(如CFM56、LEAP、PW 1000G)普遍采用空气涡轮起动机(ATS)起动。其原理是利用高压气源驱动ATS涡轮,经齿轮箱带动发动机高压转子(N2轴)。起动系统主要包括:气源(来自APU、交输引气或地面气源车)、ATS(将气能转化为机械能并传递至附件齿轮箱)、由EEC/ECU控制的起动活门(接通/切断气路)、点火系统(在N2达15~20%时点火)及燃油系统(由FMU/HMU按指令供油)^[1]。整个过程由EEC/ECU统一协调,依据预设逻辑同步各子系统动作,并实时监控N1、N2、EGT、FF等关键参数,异常时自动中止起动。起动分为冷转、点火供油和加速至慢车三个阶段,任一环节失效均可能导致起动失败。该系统高度集成、

时序精密,是保障发动机可靠起动的核心。

1.2 起动系统典型故障模式分析

根据故障现象、成因及影响,可将起动故障归纳为几类典型模式。起动机不工作的故障表现为提起发动机主电门后,N1/N2无任何转动迹象,其主要原因通常包括起动活门卡滞在关闭位、ATS内部发生机械故障(如涡轮卡死或齿轮损坏)、EEC未发出开阀指令(可能源于软件逻辑错误或传感器输入异常),或是气源压力不足及管路存在严重泄漏。起动悬挂则指发动机转速上升缓慢,并在某一低于慢车的转速下停滞不前,它又可细分为冷悬挂和热悬挂。冷悬挂时EGT和N2转速均不上升,多由起动机功率不足(如气源压力低或ATS效率下降)、燃油流量过小或点火系统完全失效引起;而热悬挂则表现为EGT迅速上升并可能超温,但N2转速停滞,这表明燃烧虽已开始,但产生的能量不足以克服阻力加速转子,常见原因有起动机提前脱开、压气机效率低下(如叶片积垢或磨损)以及燃油供油规律不匹配等。热起动是一种极具破坏性的故障,其现象是EGT急剧上升,速率和峰值均远超正常范围,通常由燃油流量过大(如FMU/HMU故障)、点火能量过高或压气机喘振导致燃烧效率异常所致,EEC一般会触发自动保护性关断。湿起动是指燃油已供给但未成功点火,导致大量未燃燃油积聚在燃烧室和尾喷管内,主要原因包括点火系统故障、点火时序错误或燃油雾化不良^[2]。假起动则是指发动机短暂点火并小幅加速后随即熄火,多由点火能量不足、燃油压力瞬时不足或EEC逻辑判断异常引起。此外,起动超时是发动机未在规定时间内达到慢车转速而被EEC自动终止的现象,通常是上述某种故障(如轻微的起动悬挂)的最终表现形式。

表1：航空发动机主要起动故障模式特征参数对照表

故障模式	N1/N2转速表现	EGT (排气温度) 表现	燃油流量(FF) 表现	典型伴随现象
起动机不工作	无任何转动	无变化	无供油	无起动机工作声音
冷起动悬挂	上升缓慢，停滞于低转速	上升缓慢或无明显上升	正常或偏低	起动机持续工作但无力
热起动悬挂	上升缓慢，停滞于低转速	迅速上升，接近或达到红线	正常	EEC可能自动中止起动
热起动	可能有初始加速	急剧、异常快速上升，远超红线	偏高	EEC强制关断，可能有异味
湿起动	无加速或微弱加速	无明显上升或轻微上升	已供油	尾喷管可见燃油渗出
假起动	短暂加速后迅速下降至零	短暂上升后迅速下降	短暂供油后中断	听到点火声但随即熄火

2 航空发动机起动故障现场诊断技术体系

2.1 基于工程经验的初步诊断

这是最直接、最快速的诊断方法，高度依赖于维修工程师的知识储备和对特定机型的熟悉程度。工程师首先会进行目视检查，仔细观察起动活门、管路是否存在明显泄漏或损伤，并检查点火电嘴区域有无燃油渗漏的痕迹。接着，他们会运用耳听法，在起动过程中专注监听是否有异常的机械噪音，例如ATS内部的摩擦声或齿轮打齿声，这些声音往往是内部机械故障的早期信号。最为关键的是参数判读，工程师会通过驾驶舱中央显示器（EICAS/ECAM）或便携式诊断设备实时监控并记录起动曲线，包括N1、N2、EGT和燃油流量（FF）等关键参数。凭借丰富的经验，他们能够从这些曲线的细微偏差中敏锐地捕捉到故障线索，例如，N2加速斜率平缓可能指向ATS存在问题，而EGT爬升速率的异常则更多地关联到燃油或燃烧系统。

2.2 基于数据分析的深度诊断

当初步诊断无法精确定位故障时，就需要借助更为深入的数据分析手段。维修团队会首先下载并分析完整的起动循环数据，这些数据通常来自飞机的ACMS或QAR系统。通过将此次故障数据与发动机健康的基线数据进行对比，可以量化各参数的偏差程度，例如计算达到特定N2转速所需的EGT值，若该值显著高于历史平均水平，则有力地表明发动机内部效率出现了下降^[3]。为了进一步确认内部状况，孔探检查（Borescope Inspection）是必不可少的步骤，工程师会使用内窥镜对发动机内部，特别是燃烧室和高压涡轮区域进行目视检查，以确认是否存在因热起动或热悬挂造成的叶片烧蚀、变形等物理损伤。在明确了大致方向后，系统隔离测试便成为关键，工程师会严格按照维修手册（AMM）的指引，对怀疑的子系统进行独立的功能测试，例如单独验证起动活门的开关功能是否顺畅，或使用外接电源直接测试点火激励器的输出能量是否达标。

2.3 智能诊断技术的辅助应用

随着机载计算能力和地面数据处理能力的飞速提升，智能诊断工具正逐步从后台走向外场，为维修工程师提

供强有力的辅助。故障树分析（FTA）是一种系统性的方法，它将“起动失败”这一顶事件逐层分解为底层的元器件故障或失效事件，最终形成一张逻辑清晰的诊断路径图，帮助工程师避免盲目排查，实现系统性、有条理的故障隔离。专家系统则是将资深工程师积累的宝贵经验规则固化为一个知识库，通过人机交互问答的形式，引导现场维修人员一步步缩小故障范围，尤其适用于新手工程师的培训和辅助决策。更具前瞻性的是机器学习模型的应用，通过利用海量的历史故障数据训练出的分类模型（如支持向量机SVM或神经网络），能够对新的起动数据进行自动分类，并给出最可能的故障类型建议。虽然目前这类模型多用于后台的大数据分析和机队健康管理，但其未来有望被集成到便携式维修终端中，为现场工程师提供实时的、数据驱动的决策支持。

3 航空发动机起动故障现场排故标准化流程

高效的排故离不开标准化的流程管理。一个典型的现场排故流程如下：

3.1 第一步：信息收集与故障复现

详细询问机组关于故障发生时的具体现象、环境条件（温度、海拔）及操作细节。在确保安全的前提下，严格按照AMM程序尝试复现故障，并全程记录关键参数。

3.2 第二步：初步分析与假设生成

结合故障现象和参数曲线，利用工程经验生成若干个最可能的故障假设（如“起动活门故障”、“点火系统失效”）。

3.3 第三步：制定排故方案

针对每个假设，查阅AMM、FIM（故障隔离手册）或TSM（排故手册），制定具体的检查、测试步骤。评估所需的人力、工时、航材和工具，并进行风险评估。

3.4 第四步：执行排故与验证

按照方案执行各项检查和测试，逐一验证或排除故障假设。一旦找到故障件，按手册要求进行更换或修理^[4]。完成维修后，必须进行完整的试车验证，确保故障已彻底排除，且发动机性能恢复正常。

3.5 第五步：记录与反馈

详细填写维修记录，包括故障描述、排故过程、更换件信息、测试数据等。将此次排故案例和数据反馈至公司的可靠性数据库（如RESDATA），用于后续的机队健康管理和维修方案优化。

4 工程实践：某航空公司A320飞机CFM56-5B发动机热悬挂故障

一架隶属于某航空公司的A320飞机，在寒冷天气（-15℃）下准备起飞时遭遇起动故障。首次起动尝试中，N2转速上升至约35%后便停滞不前，与此同时，排气温

度（EGT）迅速爬升至750℃（接近红线800℃），随后发动机电子控制器（EEC）出于保护目的自动中止了起动过程。根据这一典型现象，维修团队初步判断为热悬挂故障，并考虑到低温环境的影响，初步怀疑故障可能与燃油雾化不良或起动机性能衰减有关。为精准定位故障，维修团队参考了CFM56-5B发动机的标准起动参数，如表2所示。通过对比发现，故障发动机的N2加速性能远低于正常范围，而EGT爬升速率则异常偏高，这进一步证实了起动机功率不足的推断。

表2：CFM56-5B发动机典型起动过程关键参数正常范围

起动阶段	关键参数	正常范围/表现
起动活门打开	N2	开始从0%上升
点火 & 供油	N2	~16% - 22%
	EGT	开始从环境温度上升
加速至慢车	N2 达50%时间	< 45秒
	N2 达慢车 (~59%)	< 90秒
	EGT 峰值	< 725℃
	最终慢车 N2	~58% - 60%
	最终慢车 EGT	~400℃ - 500℃

排故工作随即展开，首先下载了ACMS数据以确认起动曲线的特征。接着，为了排除既往热损伤的可能性，对高压涡轮区域进行了孔探检查，结果显示叶片完好，无明显热损伤痕迹。随后，团队按照故障隔离手册（FIM）对燃油系统和点火系统分别进行了功能测试，结果均显示燃油压力、流量以及点火火花能量均在标准范围内。鉴于空气涡轮起动机（ATS）是低温环境下性能易受影响的关键部件，维修团队决定将其拆下送至车间进行专项性能测试。测试结果明确显示，该ATS在模拟高空低温条件下，其输出扭矩比标准值低了15%，从而证实了ATS性能衰退是导致起动机功率不足、无法在燃烧开始后有效加速转子的根本原因。在更换了新的ATS之后，地面试车顺利完成，发动机起动过程流畅，各项监控参数均符合技术标准。此案例深刻地说明了在极端运行环境下，对关键部件进行超越简单“通断”测试的深度性能评估至关重要，同时也揭示了热悬挂故障的成因具有多样性，必须依靠系统性的方法才能精准定位。

5 结语

本文系统论述了航空发动机起动故障的现场诊断与排故实践，指出成功排故依赖于对起动系统的深入理解、

精准识别故障模式，以及融合经验、数据与标准化流程的综合诊断体系。未来，故障诊断将向智能化、预测化发展：预测性维护将成为主流，通过大数据与机器学习分析起动参数的微小退化趋势，在故障发生前预警，实现从“故障后维修”到“故障前干预”的转变；数字孪生技术将构建高保真虚拟发动机模型，结合实时飞行数据，支持复杂故障的机理分析与虚拟排故演练；增强现实（AR）辅助维修也将普及，通过AR眼镜叠加三维模型、维修指引与历史信息，显著提升排故效率与准确性。这些技术的融合将使起动故障诊断更精准、高效、安全，为民航高质量、高可靠性运行提供坚实支撑。

参考文献

[1]王永华,孙涛,张赞,等.某型航空发动机起动系统故障研究[J].燃气轮机技术,2021,34(04):42-46.
[2]姚敏.航空发动机起动系统故障诊断方法研究[D].中国民航大学,2024.DOI:10.27627/d.cnki.gzmhy.2024.000611.
[3]程鲁,闫卫青,张帅,等.某型航空发动机空气涡轮起动机起动故障研究[J].内燃机与配件,2024,(09):70-73.
[4]刘杨军,王芳,杨锬.某型航空发动机低温环境起动困难故障研究[J].航空维修与工程,2023,(06):55-57.